

INTRODUZIONE ALLA SIMULAZIONE TERMOENERGETICA DINAMICA DEGLI EDIFICI



Gruppo di lavoro

I capitoli di questa linea guida sono stati redatti dai seguenti esperti:

Joseph Andrew Clarke	Università di Strathclyde Glasgow
Vincenzo Corrado	Politecnico di Torino
Enrico Fabrizio	Università di Torino
Marco Filippi	Politecnico di Torino
Giacomo Villi	libero professionista
Joseph Virgone	Université Claude Bernard Lyon 1

I casi studio di questa linea guida sono stati elaborati dai seguenti esperti:

Fabrizio Ascione	libero professionista
Alberto Bortolin	libero professionista
Nicola Cardinale	Università della Basilicata
Luca Cecchinato	libero professionista
Marco Corradi	libero professionista
Franco Cotana	Università di Perugia
Filippo de' Rossi	Università del Sannio
Enrico Fabrizio	Università di Torino
Daniele Guglielmino	libero professionista
Marco Manzan	Università di Trieste
Silvia Minetto	libero professionista
Anna Laura Pisello	libero professionista
Germana Regis	libero professionista
Gianluca Rospì	libero professionista
Samuele Testa	libero professionista
Giuseppe Peter Vanoli	Università del Sannio
Giacomo Villi	libero professionista

Revisori

La revisione di questa linea guida è stata fatta dai seguenti esperti che hanno fornito preziosi suggerimenti:

Francesca R. d'Ambrosio Alfano	Università di Salerno
Matteo Bo	libero professionista

La Commissione Comitati Tecnici ringrazia il Comitato Tecnico Sostenibilità e Zero Energy Buildings, che ha coordinato il lavoro, e tutte le istituzioni che tale lavoro hanno supportato, permettendo ed incoraggiando i loro esperti a partecipare alla produzione di questa Guida.

Matteo Bo
Presidente della Commissione Comitati Tecnici di AiCARR

INDICE

Introduzione	1
1 - Uno strumento per il progetto	
1.1 - Dal calcolo statico al calcolo dinamico	3
1.2 - La simulazione dinamica	5
1.3 - I modelli	6
1.4 - Le potenzialità	7
1.5 - I criteri di scelta di un software	8
1.6 - Le sfide future	9
Bibliografia	10
2 - I fondamenti	
2.1 - Introduzione	11
2.2 - I modelli per l'analisi energetica degli edifici	12
2.2.1 - <i>Approcci alla simulazione</i>	12
2.2.2 - <i>Modelli diretti o classici</i>	13
<i>Risultati di una simulazione diretta</i>	16
2.2.3 - <i>Modelli governati dai dati o modelli inversi</i>	16
2.2.4 - <i>Qualificazione dei modelli</i>	18
2.3 - La classificazione dei modelli di calcolo diretti	18
2.3.1 - <i>Ambiti di applicazione e condizioni al contorno</i>	18
2.3.2 - <i>Modellazione dell'ambiente costruito</i>	19
<i>Dati geometrici</i>	20
<i>Ipotesi di modellazione termica</i>	20
<i>Conduzione termica attraverso l'involucro</i>	20
<i>Scambi termici convettivi</i>	20

<i>Scambi termici per irraggiamento a bassa lunghezza d'onda</i>	21
<i>Scambi termici per irraggiamento ad elevata lunghezza d'onda</i>	21
<i>Apporti termici interni</i>	21
<i>Scambi termici per ventilazione</i>	21
<i>Comfort termico</i>	21
2.3.3 - <i>Modellazione degli impianti</i>	21
2.4 – Il focus sulla modellazione energetica dell'ambiente costruito attraverso il bilancio sull'aria	23
2.4.1 - <i>Bilancio di massa d'aria</i>	23
2.4.2 - <i>Bilancio di massa di vapore acqueo</i>	24
2.4.3 - <i>Bilancio di energia termica</i>	25
<i>Bilancio di energia termica sensibile sull'aria</i>	25
<i>Bilancio di energia termica sulla superficie interna</i>	26
<i>Bilancio di energia termica sulla superficie esterna</i>	27
<i>Conduzione termica e accumulo</i>	28
Bibliografia	28
3 - Il software ESP-r	
3.1 - <i>Introduzione</i>	31
3.2 - <i>La teoria di ESP-r</i>	32
3.2.1 - <i>Generalità</i>	32
3.2.2 - <i>Modellazione delle zone termiche e della diffusione del vapore</i>	33
3.2.3 - <i>Modellazione dei moti dell'aria tra gli ambienti</i>	34
3.2.4 - <i>Modellazione degli impianti di climatizzazione (HVAC)</i>	34
3.2.5 - <i>Modellazione dei flussi di energia elettrica</i>	35
3.2.6 - <i>Coordinamento tra i diversi domini</i>	35
3.2.7 - <i>Modellazione di nuovi componenti</i>	37
3.3 - <i>L'uso di ESP-r</i>	38
3.4 - <i>Le applicazioni di ESP-r</i>	45
3.5 - <i>Dalla ricerca alla professione</i>	45
Bibliografia	47
Webgrafia	48

4 - Il software EnergyPlus	
4.1 - Introduzione	49
4.2 - Le condizioni meteorologiche	50
4.3 - La struttura del programma	50
4.4 - Il simulatore dell'edificio	52
4.5 - Il simulatore degli impianti	58
4.6 - Lo sviluppo del software	61
4.7 - Le interfacce	62
4.8 - L'uso di EnergyPlus	63
Bibliografia	64
Webgrafia	65
Appendice 4.A - Creazione di un impianto attraverso gli HVAC Template	66
5 - Il software TRNSYS	
5.1 - Introduzione	69
5.2 - L'interfaccia grafica TRNSYS Simulation Studio	71
5.3 - Type e librerie di componenti	74
5.3.1 - <i>Librerie supplementari</i>	74
5.4 - La Type 56	75
5.4.1 - <i>Creazione del modello</i>	75
5.5 - La modellazione dello scambio termico per conduzione at- traverso le pareti	78
5.6 - Connessione con altri applicativi	78
5.6.1 - <i>GenOpt</i>	78
5.6.2 - <i>CONTAM</i>	79
5.6.3 - <i>Excel</i>	79
5.6.4 - <i>Matlab</i>	80
5.8 - Creazione di componenti aggiuntivi	80
5.8 - Conclusioni	80
Bibliografia	81
Webgrafia	82
Appendice 5.A - Modellazione di un edificio residenziale multi- piano	83

Casi studio	
Premessa ai casi studio	91
A - Edificio storico	
A.1 - <i>Obiettivo del caso studio</i>	93
A.2 - <i>Descrizione sintetica del caso studio</i>	93
A.3 - <i>Strumenti utilizzati</i>	94
A.4 - <i>Descrizione del modello</i>	94
A.5 - <i>Descrizione delle analisi eseguite e dei risultati ottenuti</i>	97
A.6 - <i>Discussione critica dei risultati e del processo</i>	100
Bibliografia	100
B - Edificio ad uso servizi	
B.1 - <i>Obiettivo del caso studio</i>	103
B.2 - <i>Descrizione sintetica del caso studio</i>	103
B.3 - <i>Strumenti utilizzati</i>	103
B.4 - <i>Descrizione del modello</i>	104
B.5 - <i>Descrizione delle analisi eseguite e dei risultati ottenuti</i>	106
B.6 - <i>Discussione critica dei risultati e del processo</i>	108
Nomenclatura	110
C - Edificio ad uso uffici	
C.1 - <i>Obiettivo del caso studio</i>	111
C.2 - <i>Descrizione del caso studio</i>	112
C.3 - <i>Descrizione delle analisi eseguite e dei risultati ottenuti</i>	114
C.4 - <i>Discussione critica dei risultati e del processo</i>	115
Bibliografia	116
D - Edificio residenziale.	
D.1 - <i>Obiettivo del caso studio</i>	119
D.2 - <i>Descrizione sintetica del caso studio</i>	119
D.3 - <i>Strumenti utilizzati</i>	119
D.4 - <i>Descrizione del modello</i>	120
D.5 - <i>Descrizione delle analisi eseguite e dei risultati ottenuti</i>	122
D.6 - <i>Discussione critica dei risultati e del processo</i>	124

<i>Bibliografia</i>	124
E - Edifici massivi	
<i>E.1 - Obiettivo e descrizione del caso studio</i>	127
<i>E.2 - Localizzazione del sito e caratteristiche microclimatiche</i>	129
<i>E.3 - Caratteristiche costruttive delle strutture analizzate</i>	130
<i>E.4 - Strumenti utilizzati</i>	133
<i>E.4.1 - Monitoraggio ambientale</i>	133
<i>E.4.2 - Proprietà termofisiche dei materiali</i>	133
<i>E.4.3 - Parametri di analisi</i>	134
<i>E.5 - Descrizione delle analisi eseguite e dei risultati ottenuti</i>	136
<i>E.6 - Discussione critica dei risultati e del processo</i>	140
<i>Bibliografia</i>	140
F - Edificio commerciale	
<i>F.1 - Obiettivo del caso studio</i>	143
<i>F.2 - Descrizione sintetica del caso studio</i>	143
<i>F.3 - Strumenti utilizzati</i>	143
<i>F.4 - Descrizione del modello</i>	144
<i>F.5 - Descrizione delle analisi eseguite e dei risultati ottenuti</i>	146
<i>F.6 - Discussione critica dei risultati e del processo</i>	149
<i>Bibliografia</i>	150
G - Sistemi energetici nel residenziale	
<i>G.1 - Obiettivo del caso studio</i>	151
<i>G.2 - Descrizione sintetica del caso studio</i>	151
<i>G.3 - Strumenti utilizzati</i>	152
<i>G.4 - Descrizione del modello</i>	152
<i>Stagione invernale</i>	152
<i>Stagione estiva</i>	154
<i>G.5 - Descrizione delle analisi eseguite e dei risultati ottenuti</i>	155
<i>Stagione invernale</i>	156
<i>Stagione estiva</i>	158
<i>Valutazioni su base annuale</i>	161
<i>G.6 - Discussione critica dei risultati e del processo</i>	162

<i>Bibliografia</i>	163
H - Componente di involucro ventilato	
<i>H.1 - Obiettivo del caso studio</i>	165
<i>H.2 - Descrizione sintetica del caso studio</i>	166
<i>H.3 - Descrizione del modello</i>	166
<i>H.4 - Strumenti utilizzati</i>	168
<i>H.5 - Discussione critica dei risultati e del processo</i>	171
<i>Bibliografia</i>	172
Profili dei curatori	175
Autori	177

GUIDA AICARR

INTRODUZIONE ALLA SIMULAZIONE

TERMOENERGETICA DINAMICA DEGLI EDIFICI

Questo volume è una guida introduttiva alle applicazioni della simulazione termoenergetica dinamica degli edifici, degli impianti di climatizzazione e dei sistemi energetici a servizio degli edifici. La guida, divisa in due parti, mette in luce gli aspetti più significativi di alcuni tra i software di calcolo maggiormente diffusi e le potenzialità delle loro applicazioni.

Nella prima parte vengono richiamati i fondamenti teorici dei modelli di calcolo utilizzati in questo campo e vengono descritte nel dettaglio le caratteristiche di tre tra i più diffusi software (ESP-r, EnergyPlus e TRNSYS), due dei quali freeware. Nella seconda parte vengono presentate – secondo uno schema comune ma non in formato di scheda, al fine di garantire un’esposizione sufficientemente chiara – applicazioni di simulazione termoenergetica dinamica a varie tipologie di edifici, non trascurando la simulazione dinamica degli impianti, evidenziandone gli ambienti di simulazione adottati, le semplificazioni, i limiti, i vantaggi e le questioni aperte.

Da questa guida risulta evidente come le applicazioni della simulazione energetica dinamica non si limitino al solo calcolo dei carichi termici, ma possano essere utilizzate per la previsione della prestazione energetica di un sistema edificio-impianti in condizioni di esercizio, per la verifica di prestazioni di comfort termico e visivo e per la progettazione di componenti di involucro innovativi così come richiesto dai protocolli di valutazione del livello di sostenibilità di una costruzione edilizia, o al servizio delle attività di post-costruzione in contesti di *continuous commissioning* o riqualificazione energetica.

INTRODUZIONE

Grazie al paziente lavoro di costruzione e validazione dei programmi di simulazione energetica dinamica sviluppato negli ultimi anni, sono a disposizione dei progettisti modelli di calcolo estremamente dettagliati e a basso costo (quando non gratuiti). Come afferma J. Clarke, ideatore del software ESP-r e uno degli autori di questo testo, questi programmi hanno grandi potenzialità e sono in grado di rendere il processo progettuale "*cheaper, better, and quicker*" (meno costoso, migliore e più veloce); purtroppo, però, di frequente sono utilizzati per una piccola percentuale delle loro potenzialità. Si consideri, ad esempio, che EnergyPlus (versione 6.0) possiede una guida all'uso di oltre 4260 pagine, quasi 600 moduli diversi, di cui oltre 200 relativi agli impianti di climatizzazione, 20 programmi ausiliari (senza contare le interfacce esterne), 530 file di esempio, 30 file di banche dati (materiali, pannelli PV, collettori solari, ecc.), con la possibilità di richiedere alcune centinaia di grandezze in uscita.

Ciascun software differisce dall'altro per impostazione dell'interfaccia grafica, dei dati di input richiesti e dei dati di output rilasciati al termine della simulazione; d'altra parte l'elevata complessità intrinseca alla modellazione energetica dinamica è tale che nessuno in assoluto può dichiararsi esperto, neppure i creatori degli stessi programmi. L'ottimale applicazione nasce da un lavoro di squadra in base al quale differenti competenze professionali si integrano operando con uno stesso modello di simulazione per confrontare le possibili alternative progettuali.

In particolare, l'utilizzo dei software di simulazione termoenergetica dinamica esige buone conoscenze dei fondamenti di termofisica dell'edificio, di climatologia edilizia e di impianti, nonché una conoscenza approfondita sulle caratteristiche prestazionali delle tecnologie edilizie e impiantistiche presenti sul mercato e oggetto di simulazione. Non di rado l'utilizzo dei software, attraverso la lettura e lo studio del loro manuale di applicazione da parte dell'utilizzatore, finisce per contribuire alla crescita culturale dell'utilizzatore stesso.

Le ragioni di questo testo, voluto dal Comitato Tecnico Sostenibilità e Zero Energy Building di AiCARR, stanno proprio nella volontà di stimolare i progettisti ad affrontare una tematica che è oggi di grande attualità ed a prendere coscienza dell'esistenza di strumenti progettuali evoluti dei quali, fra pochi anni, non si potrà più fare a meno anche nello sviluppo di progetti di non particolare importanza.

Stante la vastità dell'argomento trattato, questa guida non risulta un compendio di tutte le nozioni necessarie per comprendere e utilizzare consapevolmente i modelli di simulazione termoenergetica dinamica, né intende proporre specifiche procedure di calcolo e fornire indicazioni dettagliate sull'uso dei software, che di fatto si trovano sulle rispettive guide, ma vuole presentare l'argomento e mettere in guardia gli utilizzatori sul fatto che ogni simulazione termoenergetica dinamica richiede un attento e laborioso preliminare lavoro di calibrazione, che costituisce un aspetto non marginale dell'attività progettuale. Alla trattazione di alcuni aspetti generali relativi alla modellazione termoenergetica dinamica e all'inquadramento di tre tra i più diffusi software maggiormente diffusi (EnergyPlus, ESP-r e TRNSYS) i curatori hanno ritenuto opportuno associare una serie di esperienze di calcolo relative a diverse tipologie di edifici e impianti, realizzate con questi tre strumenti. Nella descrizione di tali esperienze emergono informazioni sugli ambienti di simulazione, sulle semplificazioni e sui limiti adottati, nonché sulle criticità riscontrate, sui vantaggi ottenuti e sulle questioni aperte.

I curatori

UNO STRUMENTO PER IL PROGETTO*

1.1 - Dal calcolo statico al calcolo dinamico

Per progettare un edificio a energia netta quasi zero o, più in generale, un edificio sostenibile dal punto di vista energetico, ambientale o economico lungo tutto il suo ciclo di vita, occorre far ricorso a pratiche progettuali che permettano di effettuare consapevolmente le scelte strategiche e tecnologiche che consentiranno il raggiungimento degli obiettivi. In particolare il progettista deve poter prevedere il comportamento del sistema edificio-impianti al variare di condizioni al contorno quali il clima, la disponibilità e il costo delle fonti energetiche, il comportamento degli occupanti, le modalità di gestione degli impianti.

Per quanto riguarda il caso specifico degli impianti di climatizzazione, in un non lontano passato i progettisti, che ben conoscevano i metodi di calcolo da utilizzare per il dimensionamento dei sistemi e dei componenti basati sul calcolo in regime stazionario riferito alla convenzionale “temperatura esterna di progetto” per il riscaldamento e sul calcolo del profilo giornaliero del carico termico nel giorno estivo più critico per il condizionamento dell’aria (metodo Carrier), non avevano a disposizione alcuno strumento di calcolo utile per simulare il comportamento dei sistemi impiantistici al di fuori delle condizioni di progetto, cioè in condizioni di carico termico di picco (misurato in unità di potenza, watt).

Un’altra incognita era poi costituita dal fabbisogno termoenergetico dell’edificio (misurato in unità di energia, joule): per la climatizzazione invernale la stima veniva effettuata con il metodo dei gradi giorno, tenendo grossolanamente conto di apporti gratuiti e inerzia termica della costruzione in caso di

* di Marco Filippi e Enrico Fabrizio

funzionamento intermittente dell'impianto; il fabbisogno per la climatizzazione estiva era invece del tutto ignorato, in quanto non si era in grado di calcolarlo. Con l'avvento della Legge 10 del 1991 e del successivo Decreto attuativo D.P.R. 412 del 1993 venne radicalmente modificato, almeno per quanto riguarda il tema del riscaldamento, l'approccio progettuale originariamente proposto dalla Legge 373 del 1976: non fu più sufficiente assicurarsi che la potenza termica installata risultasse inferiore al valore massimo ammissibile, ma divenne necessario garantire che il fabbisogno termoenergetico convenzionale dell'edificio non superasse determinati valori limite in relazione alla zona climatica e al fattore di forma dell'edificio. La Legge 10/91 si propose dunque di raggiungere un maggiore livello di consapevolezza da parte dei progettisti: essi non si dovevano limitare a contenere le dispersioni termiche per trasmissione e per ventilazione dell'edificio, ma dovevano radicalmente modificare la concezione edile e impiantistica del progetto, fino ad allora vissute come fasi distinte destinate a sovrapporsi e a mettersi in relazione solo nella fase di realizzazione dell'opera.

La norma UNI 10344 "Riscaldamento degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia" (poi seguita dalla norma UNI 10379 "Riscaldamento degli edifici. Fabbisogno energetico convenzionale normalizzato. Metodo di calcolo" del 1993 e dalla norma UNI EN 832 "Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento. Edifici residenziali" del 2001) fu la prima a fornire un vero e proprio metodo di calcolo della quantità di energia richiesta per il riscaldamento durante la stagione invernale, introducendo la valutazione analitica degli apporti termici gratuiti, solari o endogeni, e definendo un fabbisogno energetico normalizzato (FEN).

La messa a disposizione di una metodologia che consentiva il calcolo del fabbisogno termoenergetico di un edificio fu di grande stimolo per indurre i progettisti più sensibili a confrontare le prestazioni energetiche corrispondenti a differenti alternative progettuali, edilizie e impiantistiche, a stimare l'effetto di possibili misure di risparmio energetico su un edificio esistente o a ricercare soluzioni innovative per soddisfare i requisiti minimi di prestazione energetica espressi da leggi, regolamenti e norme tecniche. Si passò così gradualmente da un concetto di "progettazione termotecnica" ad un concetto di "progettazione energetica".

Con il D.Lgs. 192 del 2005, in attuazione della Direttiva Europea 2002/91/CE, e con i successivi D.Lgs. 311 del 2006 e D.P.R. 59 del 2009, tuttora vigenti, si confermò il riferimento cogente al fabbisogno energetico dell'edificio piuttosto che alla potenza installata, e vennero definiti indici di prestazione energetica EP espressi sotto forma di energia primaria e nell'unità di misura kWh/(m²anno), riferiti non soltanto più alla climatizzazione invernale, ma anche alla climatizzazione estiva, alla produzione di acqua calda per usi sanitari e all'illuminazione artificiale.

In particolare le specifiche tecniche UNI/TS 11300, che definiscono le modalità per l'applicazione della norma UNI EN ISO 13790 del 2008, conducono oggi i progettisti a svolgere il calcolo dei fabbisogni termoenergetici dell'edificio, sia nel periodo invernale che in quello estivo, in condizioni di progetto (design rating), in condizioni standard (asset rating) utili per la certificazione energeti-

ca ed in particolari condizioni climatiche e di esercizio (tailored rating). Il metodo di calcolo utilizzato è basato sull'ipotesi di regime "quasi stazionario" e considera valori medi mensili delle variabili in gioco.

Il calcolo del fabbisogno di energia, diversamente da quello di dimensionamento, è sempre riferito a condizioni medie, ma i valori medi mensili non consentono di delineare con un sufficiente grado di dettaglio il comportamento nel tempo del sistema edificio-impianti.

Nasce così, nel contesto di una progettazione sempre più "integrata" (cioè in grado di valutare le interazioni fra i diversi sub-sistemi che interagiscono nel sistema edificio-impianti) e "consapevole" (cioè in grado di prevedere i futuri comportamenti del sistema al variare delle condizioni al contorno), l'esigenza dei progettisti di estrazione termotecnica di disporre di strumenti di calcolo più avanzato, al di là di quanto richiesto dalla normativa (che costituisce pur sempre un requisito minimo), per poter esaminare nel dettaglio temporale, cioè in un regime "dinamico", gli effetti delle scelte progettuali compiute.

1.2 - La simulazione dinamica

La simulazione numerica delle prestazioni degli edifici (*building performance simulation*) è una disciplina che, nata negli anni '80 nelle sedi accademiche, ha avuto nell'ultimo decennio importanti sviluppi: è cresciuto il numero di programmi disponibili ed è cresciuta la robustezza e l'affidabilità di tali programmi, grazie anche al loro impiego e alla loro validazione su larga scala.

La simulazione termoenergetica dinamica ha visto un forte incremento sia a livello di applicazione che di ricerca nell'ultimo quinquennio: il semplice regesto degli articoli di ricerca scientifica pubblicati in argomento lo dimostra chiaramente. Essa sta riscuotendo sempre più interesse in ambito professionale: ciò è dovuto a molti fattori, tra cui la diffusione di codici di calcolo sempre più dettagliati e liberamente disponibili in rete, che consentono di verificare il comportamento energetico di componenti edilizi ed impiantistici innovativi e di valutare le prestazioni energetiche degli stessi sul lungo periodo. Nel database "Building Energy Software Tools Directory" del Department Of Energy (DOE) statunitense si può trovare una catalogazione ragionata di ben 400 software per la simulazione delle prestazioni energetiche e del comfort ambientale degli edifici.

Disponendo di un programma di simulazione termoenergetica è oggi possibile valutare gli effetti dell'orientamento dell'edificio e/o della distribuzione delle sue masse termiche, i vantaggi ottenibili adottando involucri edilizi a prestazioni variabili in termini di isolamento termico e di schermatura solare, gli esiti dell'installazione di un impianto a tutt'aria piuttosto che di un impianto misto con aria primaria e pannelli radianti, le prestazioni di sistemi energetici alimentati da fonti energetiche rinnovabili, ecc. Con un programma di questo tipo si riescono ad ottimizzare le prestazioni del sistema edificio-impianti valutando oggettivamente l'impatto di ogni singola scelta attraverso un processo iterativo; ciò può essere fatto già nelle fasi preliminari della progettazione, quando si fanno le scelte che avranno maggiore ricaduta sulle prestazioni dell'edificio e sui suoi costi di investimento e di esercizio.

Anche le più diffuse procedure di valutazione del livello di sostenibilità di una costruzione edilizia, come ad esempio la procedura LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) proposta in Italia dal Green Building Council Italia, considerano l'impiego della simulazione termoenergetica dinamica come lo strumento principe per dimostrare il miglioramento dell'indice di prestazione energetica di un edificio. Nella versione 2009 del manuale LEED Nuove Costruzioni e Ristrutturazioni, l'utilizzo dell'opzione che prevede l'impiego di una procedura semplificata per la determinazione della prestazione energetica dell'edificio (con riferimento agli indici EP previsti dalla vigente legislazione) consente di ottenere al massimo 3 crediti, mentre l'utilizzo dell'opzione che prevede l'impiego della simulazione energetica in regime dinamico e su base annuale (effettuata ai sensi della norma statunitense ANSI/ASHRAE 90.1-2007) consente di ottenere fino a 19 crediti.

Solo utilizzando strumenti di calcolo che consentono di verificare le prestazioni energetiche degli edifici nelle condizioni dinamiche che caratterizzeranno il loro ciclo di vita è concretamente possibile conseguire l'obiettivo di progettare edifici con prestazioni tali da minimizzare il loro costo globale (il *nearly net Zero Energy Building* di cui parla la Direttiva Europea 2010/31/UE del 19 maggio 2010 EPBD recast).

Infine, si può annotare che si registra un crescente interesse per l'impiego della simulazione energetica dinamica *tailored* (in condizioni di esercizio) a servizio delle attività di post-costruzione, quali quelle previste in contesti di "*continuous commissioning*" o di riqualificazione energetica degli edifici esistenti.

1.3 - I modelli

Il modello di calcolo che sta alla base dei software di simulazione energetica più correnti è basato sulla conoscenza delle leggi fisiche che regolano il sistema oggetto di analisi; inserendo gli opportuni dati di ingresso e le condizioni al contorno, si ottengono i dati di uscita (risultati) richiesti.

Nel tempo sono stati costruiti modelli via via più complessi, aumentando progressivamente il grado di dettaglio nella rappresentazione dei fenomeni fisici che si volevano descrivere. Quanto agli algoritmi che si utilizzano per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, è possibile distinguere essenzialmente modelli di calcolo basati sulle funzioni di trasferimento e modelli ai volumi finiti.

Una funzione di trasferimento è un algoritmo in grado di legare le sollecitazioni (ad es. temperature, flussi termici) indotte su un sistema con la risposta del sistema stesso. Nel metodo TFM (*transfer function method*), vengono utilizzate funzioni di trasferimento della parete (CTF, *conduction transfer function*) per il calcolo del flusso termico trasmesso per conduzione all'interno delle varie pareti d'involucro, funzioni di trasferimento "ambiente" (RTF, *room transfer function*) per valutare il flusso termico convettivo che deve essere fornito all'aria ambiente, e funzioni di trasferimento "impianto" (SATF, *space air transfer function*) per valutare il flusso termico che deve essere fornito dall'impianto di climatizzazione. Nella più recente versione del manuale ASHRAE Fundamentals, al metodo TFM è stato sostituito un metodo che fa

uso delle sole funzioni di trasferimento CTF per la valutazione del flusso termico trasmesso per conduzione attraverso l'involucro in regime dinamico, mentre il bilancio termico sull'aria ambiente (AHB, *Air Heat Balance*) viene applicato per valutare il flusso termico che deve essere fornito all'ambiente per mantenere una certa temperatura. Tale modello di calcolo è quello adottato ad esempio dai software di simulazione termoenergetica EnergyPlus e TRNSYS.

Nei metodi ai volumi finiti il sistema continuo oggetto di analisi – il dominio – viene suddiviso in un insieme di porzioni discrete (volumi di controllo) a ciascuna delle quali viene applicata una serie di equazioni di bilancio (conservazione della massa, conservazione dell'energia,...). In tale approccio è possibile migliorare la soluzione aumentando il grado di discretizzazione del dominio: l'aria interna ad un ambiente può ad esempio essere considerata come un unico volume di controllo (perciò con proprietà quali temperatura, umidità e concentrazione di inquinanti costanti) oppure suddivisa in molteplici volumi di controllo per studiarne ad esempio la stratificazione termica. Questa seconda soluzione risulta utile nel caso della determinazione del flusso termico scambiato per conduzione attraverso una parete, poiché possono essere determinati i valori di temperatura e flussi termici in corrispondenza delle separazioni tra un volume e l'altro, ovvero all'interno della parete. Tale modello di calcolo è quello adottato dal software di simulazione termoenergetica ESP-r.

1.4 - Le potenzialità

Come si è accennato in precedenza, le ragioni per cui viene utilizzata la simulazione termoenergetica dinamica sono molteplici, da quelle consolidate ormai da tempo quali:

- la determinazione dei carichi termici e frigoriferi dei vari ambienti e di un edificio per il progetto degli impianti di climatizzazione (calcolo di progetto);
- la determinazione dei consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento degli edifici per il rispetto di valori prestazionali imposti dalla legislazione e dei valori prestazionali tali da attribuire un punteggio all'interno di protocolli di valutazione della sostenibilità (calcolo di stima dei consumi);

ad altre più recentemente emerse quali:

- le condizioni di comfort termico e di qualità dell'aria all'interno degli ambienti, in connessione con i consumi energetici richiesti;
- il consumo elettrico per illuminazione artificiale (aspetto legato alle caratteristiche dell'edificio, allo sfruttamento degli apporti solari gratuiti e al consumo energetico per la climatizzazione);
- le emissioni in atmosfera di inquinanti prodotti dall'esercizio dei sistemi energetici di cui è dotato un edificio;
- la prestazione di impianti alimentati con fonti energetiche rinnovabili.

Per soddisfare le esigenze del progettista sono disponibili specifici software di calcolo per ogni ambito di analisi (ad esempio il software per il dimensionamento degli impianti e il calcolo dei consumi, quello per il comfort termico, quello per la ventilazione naturale, quello per il solare termico, quello per il solare fotovoltaico, ecc.) oppure è possibile utilizzare i più recenti e completi sof-

ware di calcolo termoenergetico degli edifici che consentono di svolgere, attraverso l'impiego di un unico modello, quasi tutti gli ambiti di analisi suddetti. I risultati che si possono ottenere con un modello di simulazione termoenergetica dinamica, di norma gestito con passo temporale sub-orario, sono numerosi e di grande interesse per il progettista. Fra questi si citano, a titolo di esempio:

- lo studio dell'andamento orario della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria ambiente in assenza di controllo climatico artificiale (ambiente *free running*), aspetto fondamentale nella verifica del comportamento passivo di un edificio attraverso strategie di isolamento termico, inerzia termica, ventilazione, ombreggiamento ecc.;
- lo studio delle prestazioni, energetiche e di comfort termico, di diverse soluzioni di involucro edilizio;
- lo studio dell'andamento orario dei carichi termici e frigoriferi di un edificio (sotto forma di profili orari o curve di frequenza cumulate), dalla conoscenza dei quali è possibile valutare, in cascata, la prestazione dei sistemi energetici a servizio dell'edificio (caldaie, pompe di calore, sistemi energetici integrati ecc.);
- lo studio dell'andamento orario delle condizioni di funzionamento e delle prestazioni di impianti di climatizzazione (ad aria, fan coils, radianti, ecc.) in relazione alle caratteristiche dell'edificio e dei sistemi energetici al suo servizio.

La maggiore criticità che si incontra nell'utilizzo di un modello di simulazione dinamica è costituita dalla disponibilità di dati di ingresso variabili con passo orario, siano esse grandezze climatiche esterne (temperatura, umidità relativa, irradianza solare ecc.) o profili di occupazione all'interno dell'edificio.

1.5 - I criteri di scelta di un software

Dato per assodato che tutti i modelli di calcolo sono disponibili sotto forma di strumenti informatici, per selezionare un software di calcolo occorrerà valutare con attenzione:

- la possibilità di analizzare il fenomeno di interesse (ad esempio inerzia termica, ombreggiamento, regolazione degli impianti di climatizzazione, inerzia igrometrica, inserimento di PCM ecc.);
- le modalità di calcolo dei carichi termici;
- la tipologia di modellazione dei componenti di involucro;
- le modalità di modellazione dei flussi d'aria e della ventilazione;
- i modelli degli impianti di climatizzazione;
- i modelli dei sistemi energetici, per l'utilizzo delle fonti rinnovabili e degli impianti elettrici;
- la natura dei dati di ingresso meteorologici e la disponibilità degli appropriati dati climatici tipizzati;
- la complessità dei dati di input e la qualità dei dati di output;
- l'accessibilità, le interfacce e l'interoperabilità.

Un confronto dettagliato tra 20 software di simulazione termoenergetica dinamica è contenuto nel rapporto "Contrasting the capabilities of building energy

performance simulation programs”.

Inoltre, la simulazione dei sistemi impiantistici per la climatizzazione risulta ancora caratterizzata da notevole complessità – tanto più nel caso di sistemi energetici integrati, come quelli in uso nel residenziale – e viene quindi affrontata in pochi casi, se non per studi di dettaglio. Ancora più marginale è l'impiego della simulazione dei sistemi di generazione di energia elettrica distribuita, per i quali invece continuano ad ottenere maggior consenso software dedicati, quali ad esempio HOMER, MERIT e RETScreen, rispetto ai software termoenergetici “completi” quali EnergyPlus, TRNSYS, ecc.

1.6 - Le sfide future

Dal punto di vista dell'applicazione si possono citare alcuni aspetti che possono essere considerati come le sfide del prossimo futuro nel campo della simulazione termoenergetica dinamica.

Un primo aspetto riguarda l'incertezza delle variabili di ingresso: i calcoli di termofisica dell'edificio vengono effettuati a partire da dati di ingresso misurati o stimati con una determinata incertezza; tale incertezza, di norma, non viene presa in considerazione, ma, via via che si affinano i modelli di calcolo (passando da regimi quasi stazionari a regimi dinamici), si rende necessario considerare con estrema attenzione la qualità dei dati di ingresso (input) in quanto dati incerti possono generare risultati (output) inattendibili. L'obiettivo ultimo da conseguire è che il livello di incertezza sia ridotto a tal punto da non influire sulle scelte progettuali. Questa problematica diviene ancora più evidente quando si confrontino le prestazioni energetiche calcolate con quelle misurate, in quanto queste ultime si discostano anche significativamente dalle prime. Vengono allora applicati ai dati di ingresso degli intervalli di incertezza, in maniera da ottenere la restituzione automatica di risultati caratterizzati da grandezze probabilistiche. Una delle cause di scostamento, anche di un ordine di grandezza, tra i valori di consumo simulati e quelli misurati è connessa, ad esempio, alla modellazione del comportamento degli occupanti: vi è allora la necessità di introdurre all'interno di una simulazione il reale comportamento dell'occupante per quanto attiene all'occupazione dei locali, alla gestione dei *set point* di temperatura (termostati ambiente, valvole termostatiche, ecc.) o all'apertura e chiusura delle finestre.

Nel caso di edifici esistenti si rende necessario adottare pratiche di simulazione “calibrata”, in cui il modello di simulazione non si riferisce ad un edificio virtuale bensì all'edificio reale (la calibrazione si fa sulla base di dati misurati). In quest'ottica, il modello di simulazione energetica può essere utilizzato per gli scopi più diversi durante la vita utile dell'edificio, come la previsione dei consumi che si avranno nel futuro in relazione a interventi di riqualificazione energetica di carattere edilizio o impiantistico, alla modifica del comportamento degli occupanti o alla variazione delle condizioni meteorologiche.

Un secondo aspetto che merita di essere sottolineato riguarda la modifica dell'approccio progettuale generata dall'impiego della simulazione termoenergetica dinamica: si passa da un approccio del tipo “progetto → verifica” ad uno basato sull'ottimizzazione.

Appare infatti non più sufficiente utilizzare la simulazione come strumento di verifica di soluzioni progettuali pre-determinate (ad esempio, qual è l'effetto della variazione della schermatura, dell'incremento dell'isolamento termico) e si sta cercando di utilizzare i modelli di simulazione in associazione a tecniche di ottimizzazione per accrescerne le potenzialità e ampliare il dominio delle possibili soluzioni indagate. È così possibile determinare quale sia, ad esempio, la condizione limite in cui non è più economicamente conveniente ridurre la domanda di energia perché risulta maggiormente conveniente sfruttare le fonti rinnovabili. È questa la medesima impostazione che i comitati tecnici europei stanno utilizzando per la determinazione del livello di prestazione energetica ottimale di un edificio in funzione dei costi, prestazione su cui tarare il valore degli edifici a energia netta quasi zero.

Alcuni ulteriori aspetti riguardano le attività che si stanno svolgendo per standardizzare i modelli di simulazione al fine di aumentare compatibilità, reciproca validazione e *collaborative design*, favorire l'integrazione dei software di simulazione termoenergetica in applicazioni diverse e migliorare la qualità delle interfacce utente dei software dettagliati. A questo tema si legano le promettenti prospettive di integrazione tra Building Integrated Modelling (BIM) e Building Simulation. Sono molte tuttavia le sfide che si pongono per un utilizzo diffuso e proficuo del BIM: è necessario sopperire alla mancanza di protocolli condivisi per la creazione dei modelli di oggetti e librerie; migliorare, da parte di produttori e industrie, l'accesso alle informazioni sui prodotti edilizi; diffondere l'adozione di linee guida comuni per la creazione di modelli che consentano la corretta simulazione termoenergetica, acustica ed illuminotecnica; migliorare gli standard per la condivisione e lo scambio delle informazioni senza che la standardizzazione comporti una perdita del contenuto di innovazione.

Bibliografia

Crawley D., Hand J., Kummert M., Griffith B. 2008. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), 661-673

GENERIAMO IDEE PER UN'ENERGIA SOSTENIBILE

AiCARR, Associazione italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione, crea e promuove cultura e tecnica per il benessere sostenibile, contribuendo al progresso delle tecnologie impiantistiche e alla definizione delle normative relative alla produzione, alla distribuzione e all'utilizzo dell'energia termica. Nata nel 1960 come costola italiana della prestigiosa associazione statunitense ASHRAE, AiCARR riunisce oggi circa 2000 associati di varia estrazione: progettisti, docenti, installatori e manutentori, aziende produttrici, funzionari di Enti e Agenzie governative, istituzioni territoriali, nazionali e internazionali, studenti e ricercatori. La presenza nelle sedi accademiche e istituzionali dove si progetta il futuro energetico del nostro Paese fa di AiCARR un punto di riferimento essenziale per la definizione delle strategie e delle politiche energetiche e un interlocutore insostituibile per chiunque si occupi di efficienza energetica, qualità ambientale, fonti rinnovabili e uso consapevole dell'energia.

LE COMPETENZE CONDIVISE SONO ALLA BASE DI OGNI PROGRESSO

Accrescere la cultura tecnica del settore e la professionalità dei Soci, condividere know-how, redigere e diffondere linee guida di supporto nella pratica professionale, dare un appoggio concreto al mondo imprenditoriale che si occupa di temi energetici, fornire il proprio contributo in ambito normativo sono i principali impegni che AiCARR svolge attraverso:

- Convegni nazionali e internazionali, webinar, seminari, workshop, tavole rotonde
- Incontri tecnici e visite a impianti e realizzazioni d'avanguardia
- Commissioni di studio e coordinamento di attività tecniche, culturali e normative
- Comitati Tecnici attivi su tematiche specifiche
- Attività congiunte con Associazioni, Università ed Enti italiani ed europei, pubblici e privati

- Gruppi di lavoro creati per dare un supporto operativo alle Istituzioni
- Partecipazione alla definizione di regolamenti, leggi, linee guida e collaborazione alla redazione di normativa tecnica con UNI, CEN e CTI, grazie alla Commissione Tecnica e Normativa.

AGGIORNAMENTO E FORMAZIONE: UN MUST

L'aggiornamento tecnologico e normativo è oggi imprescindibile per professionisti e aziende: in quest'ottica AiCARR offre formazione di alto standard teorico e applicativo attraverso AiCARR Formazione, business unit di AiCARR Educational srl, società certificata ISO 9001:2015.

AiCARR Formazione è provider di CNI e CNPI per i crediti formativi professionali e i suoi corsi, condotti da accademici e professionisti selezionati fra i migliori esperti del settore HVAC&R, sono rivolti a progettisti, tecnici, manutentori, personale tecnico e commerciale di Enti e industrie, studenti e ricercatori.

SE LE IDEE CIRCOLANO, ACQUISTANO PIÙ FORZA

AiCARR pubblica gli atti dei convegni, cura l'edizione delle collane dei volumi tecnici, delle guide e dei vademecum, invia la newsletter quindicinale con le notizie sulle novità associative, editoriali, normative, legislative e di formazione; è distributore esclusivo per l'Italia delle pubblicazioni e norme ASHRAE e applica ai Soci condizioni favorevoli per l'acquisto delle norme CEI e sconti sulle pubblicazioni di importanti editori tecnici.

La biblioteca propone un'ampia selezione di titoli tecnico-scientifici in libera consultazione.

Sul sito www.aicarr.org e attraverso la App, scaricabile da Google Play, è anche possibile consultare articoli tecnici e la rassegna news. Inoltre, i Soci ricevono gratuitamente il periodico AiCARR Journal, organo ufficiale dell'Associazione.

La simulazione termoenergetica dinamica risulta uno strumento essenziale per rispondere ai requisiti dei protocolli di valutazione del livello di sostenibilità di una costruzione edilizia o per svolgere alcune attività della post-costruzione in contesti di *continuous commissioning* o riqualificazione energetica. Le sue applicazioni non si limitano al calcolo dei carichi termici, ma comprendono la previsione della prestazione energetica del sistema edificio-impianti in condizioni di esercizio, così come la previsione di condizioni di comfort termico e visivo.

Questa guida, divisa in due parti, mette in luce gli aspetti più significativi di alcuni tra i software di calcolo maggiormente diffusi e le potenzialità delle loro applicazioni. Nella prima parte vengono richiamati i fondamenti teorici dei modelli di calcolo utilizzati in questo campo e vengono descritte nel dettaglio le caratteristiche di tre tra i più diffusi software (ESP-r, EnergyPlus e TRNSYS), due dei quali freeware. Nella seconda parte vengono presentate applicazioni a varie tipologie di edifici, non trascurando la simulazione dinamica degli impianti, evidenziando gli ambienti di simulazione adottati, le semplificazioni, i limiti, i vantaggi e le questioni aperte.

La Commissione Comitati Tecnici è un organo consultivo permanente di AiCARR che ha come scopo l'aggiornamento, l'approfondimento e la divulgazione delle tematiche nei settori di interesse dell'Associazione. Svolge il proprio compito gestendo e controllando l'attività di 10 Comitati Tecnici, fra i quali il Comitato Tecnico Sostenibilità e Zero Energy Building (CTSZEB), che ha il compito di trattare le tematiche relative agli aspetti prestazionali, progettuali, costruttivi e manutentivi riguardanti gli edifici sostenibili, con particolare riferimento a quelli a consumo energetico nullo o quasi nullo. Il CTSZEB è coordinato dal prof. ing. Marco Filippi, past-president AiCARR.

AiCARR, Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione, è un'associazione culturale no profit. Dal 1960 crea e promuove cultura e tecnica per il benessere sostenibile, occupandosi di uso consapevole dell'energia e delle risorse naturali e di innovazione delle infrastrutture energetiche, sia nel settore impiantistico che in quello edilizio. AiCARR conta oltre 2.600 Soci fra progettisti, costruttori di macchine, installatori, manutentori, accademici, ricercatori, studenti, funzionari di Enti e Agenzie governative e di istituzioni nazionali e internazionali.

La Collana AiCARR propone testi tecnici elaborati da Soci e selezionati dalla Commissione Editoria AiCARR, traduzioni di Linee Guida pubblicate da associazioni internazionali quali REHVA e ASHRAE e le Guide AiCARR realizzate dai Comitati Tecnici dell'Associazione.

AiCARR - Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione - www.aicarr.org

CODICE ITE

www.editorialedelfino.it

ISBN 978-88-97323-14-3



€ 15,70 + IVA 21% = € 19,00

Questo volume è approvato dal Tribunale
(vendita e altri atti di disposizione vietati art. 17 e 2, L. 633/1941).
Esente da IVA. (D.P.R. 26/10/1972, n. 633 art. 2, lett. d).
Esente da bolli di accompagnamento (D.P.R. 6/10/1978, n. 627 art. 4, n. 6).

**INTRODUZIONE ALLA SIMULAZIONE
TERMOENERGETICA DINAMICA**
ISBN 978-88-97323-14-3